

美国 SLS 重型火箭最新进展及启示分析

摘要：SLS 项目自 2011 年 9 月对外发布方案以来已经取得多项进展，包括芯级发动机和固体助推器的热点火试验、芯级结构件的制造生产以及 SLS 项目的关键设计评审(CDR)。本文以即将首飞的 SLS 1 型火箭为主，介绍了各主要分系统的最新进展和变化情况。

一、SLS 项目背景与实施途径

随着人类探索太空的不断深入，NASA 将未来的探索目标瞄准了更加遥远的深空。2010 年 4 月，奥巴马总统提出了新的载人火星探索构想并得到国会批准。2011 年 9 月，NASA 正式对外公布了美国新型重型运载火箭——航天发射系统(SLS)方案。

2015 年 8 月，NASA 对外发布了火星探索路线图，将人类登陆火星计划分为三个阶段：即“地球依赖”阶段、“地月试验场”阶段和“地球独立”阶段。“地球依赖”阶段主要以国际空间站(ISS)为平台，继续收集 ISS 技术试验信息，为深空探索任务做准备。“地月试验场”阶段主要发展深空运输基础设施，进入地月空间开展一系列试验，验证人类火星探索任务所需要的能力。“地球独立”阶段将发射载人飞船进入火星轨道，最终实现航天员登陆火星表面，开展科学技术研究。为实现这些目标，分阶段研制 SLS 重型火箭成为美国载人火星探索计划的最重要组成部分之一。

NASA 采取渐进式、分阶段方式研制 SLS 重型运载火箭。SLS

火箭有三个基准构型，分别为：SLS 1 型、SLS 1B 型和 SLS 2 型。其中，SLS 1 型的低地球轨道(LEO)运载能力为 70 吨，而改进的 SLS 1B 型和最终的 SLS 2 型 LEO 运载能力分别达到 105 吨和 130 吨(见图 1)。

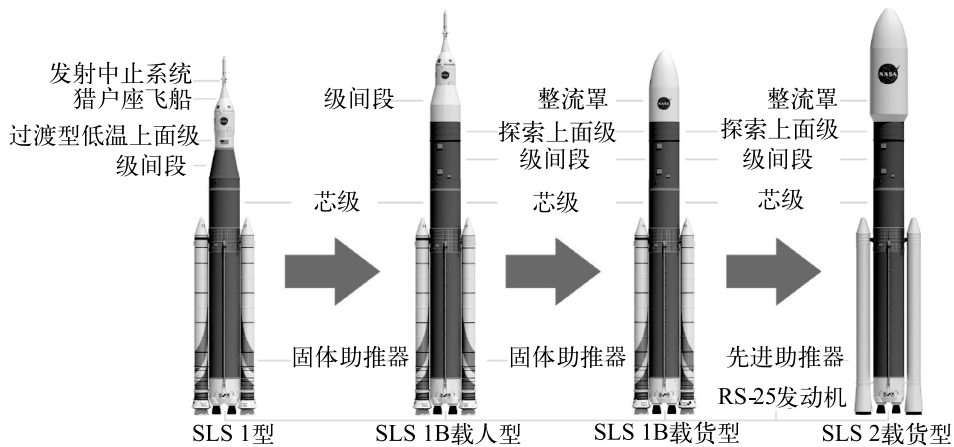


图 1 NASA 最新公布的 SLS 火箭构型图

SLS 1 型全长 98.2 米，起飞质量 2500 吨，起飞推力约 39000 千牛，由 4 台 RS-25 液氢/液氧芯级主发动机和 2 个五段式固体火箭助推器组成。芯级高 64.6 米，直径 8.4 米，可以容纳 952 吨的推进剂，容积居世界之首。五段式固体助推器高 53.9 吨，直径 3.7 米，推进剂质量约 680 吨。芯级和助推器的发动机都继承了航天飞机项目的硬件。SLS 1B 分载人型和载货型两种，芯级和捆绑助推器与 SLS 1 型相同，将采用由 4 台 RL10C 发动机组成的探索上面级(EUS)。SLS 2 型将延用 SLS 1B 型的芯级和上面级，新研先进固体或液体捆绑助推器以将运载能力提高到 130 吨。

SLS1 型火箭将于 2018 年 9 月执行首飞任务，即探索任务 1 (EM-1)，发射“猎户座”飞船执行无人绕月飞行，测试箭船的整体性能。EM-2 任务计划在 2021 年左右进行，将首次发射载人的

猎户座飞船进行绕月飞行并返回地球，为载人火星任务做准备。SLS 火箭的后续任务和有效载荷尚未确定，多种方案现处于研究阶段，其中包括载人登陆小行星和对木卫二进行机器人科学考察。

二、SLS 项目最新进展

SLS 项目按照 NASA 系统工程/项目寿命周期管理，划分为 7 个递进阶段，分别为：概念探索阶段，概念研究和技术开发阶段，初步设计和技术完善阶段，详细设计和制造阶段，系统组装、集成、试验和投产阶段，运行使用与维护阶段与退役处理阶段。到目前为止，SLS 项目已完成了前 4 个阶段，并通过了系统需求评审(SRR)、系统定义评审(SDR)、初步设计评审(PDR)和关键设计评审(CDR)。

关键设计评审结果认为 SLS 1 火箭的设计在技术上正确、有效、成熟，可以进入系统组装、集成、试验和投产阶段。这也是 NASA 继航天飞机后首次进行重型火箭的关键设计评审。SLS 项目在完成火箭的制造、组装和试验后将于 2017 年进行设计鉴定(DC)，即按照初始设计评估制造完成的火箭。此外，首飞前的里程碑事件还包括系统集成评审(SIR)、试验准备评审(TRR)、运行使用准备评审(ORR)和飞行准备评审(FRR)。

2016 年，SLS 项目在芯级制造、芯级发动机试验、助推器试验等关键部段和分系统方面取得了诸多进展。

(一)大直径芯级

SLS 芯级是目前世界上最大的火箭推进级，由波音公司在位于新奥尔良州的 NASA 米丘德工厂进行生产制造。芯级主要分为 5 部分：氧箱(容积为 742 立方米)、氢箱(容积为 2032 立方米)、前裙段、箱间段和发动机段。各部分通过环状连接件连接以保证强度。

芯级的焊接工装建设已取得显著进展，箱段、箱底和环状结

构件的生产在进行中。米丘德工厂的垂直组装中心(VAC)已完成安装,该工装高 51.8 米,宽 23.8 米,是世界上最大的搅拌摩擦焊工装。此外,米丘德工厂还安装了另外 5 台先进的焊工装。所有芯级结构件(含样件、试验件和飞行件)的焊接工作于 2016 年夏全部完成,为 SLS 火箭 2018 年首飞做准备。

为确保芯级能够承受火箭起飞时和飞行过程中的载荷,NASA 专门为 SLS 芯级修建了 4 座新的结构试验台,分别用于芯级氢箱、氧箱、级间段和发动机段的试验。氢箱试验台高约 65.53 米,在原“土星”5 火箭 F-1 发动机的试验台基座上建造,用于测试液氢贮箱。氧箱试验台位于马歇尔航天中心西试验区,高约 26 米,用于测试液氧贮箱和前裙段。箱间段试验台和发动机段试验台高度分别达到 18.9 米和 15.2 米,计划用于 SLS 芯级箱间段和发动机段的载荷测试。新型试验台 2016 年底完工,2017 年可进行贮箱的结构试验。

(二) RS-25 低温主发动机

SLS 三种构型都将采用 RS-25 发动机作为芯级主发动机。该发动机由航空喷气·洛克达因公司生产,是历史上第一台可重复使用火箭发动机,也是最可靠、试验次数最多的大型火箭发动机之一。它曾用作航天飞机的主发动机,特点是性能稳定,可靠性高,任务成功率达到 100%,可靠性达 0.9996。在航天飞机 135 次任务和相关发动机试验中,RS-25 发动机共计进行了 100 万秒的热点火。

RS-25 发动机将在 SLS 火箭上升段为芯级提供推力,每台发动机可以产生约 2320 千牛的真空推力,达到额定值的 109%。SLS 项目目前有 16 台飞行用 RS-25 发动机和 2 台试验用发动机,分别用于 SLS 火箭的前 4 次飞行任务和所需的发动机改进。

过去几年,发动机的改进工作主要围绕 SLS 性能需求展开。其中 0525 号试验型发动机在 2015 年完成了首轮 7 次热点火试验,

总时长超过 3000 秒。关键目标包括：确定新的推进剂入口条件和启动程序；确定接口条件改进，包括新的底部热环境；硬件验收试验和含流体动力在内的延寿；新型控制器和软件的研发和鉴定。

首轮热点火试验已经取得成功。2016 年首次点火试验使用了参加 SLS 第二次飞行任务的发动机(2059 号)，试验目标主要是验证新型发动机控制器，检查发动机在不同温度、压力条件下的点火情况和在各种功率下的运行性能，以及推进剂流量传感器的性能。此外，还进行 3 次试验型发动机(0528 号)的热点火试车，时长超过 1500 秒，主要验证发动机和新型控制器的性能。2017 年，NASA 还将进行 4 台 RS-25 发动机的联合试验。

后续飞行任务所用发动机的生产工作也将重启。洛克达因公司重新启动 RS-25 主发动机的研制工作，对发动机进行优化，将其改为一次性使用发动机，成本更低，推力可达到额定功率的 111%。扩展合同包括生产 6 台新型发动机，用于 SLS 后续飞行任务。

(三) 捆绑助推器

SLS 1 型和 SLS 1B 型火箭配备了 2 台五段式固体助推器，由轨道 ATK 公司(原阿连特技术系统公司)研制生产，它是世界上最大的固体助推器，由航天飞机原四段式固体助推器改装而来。助推器将为 SLS 重型火箭提供 75% 的推力。该助推器在原有基础上进行了改进：改用无石棉隔热材料，增大喷管以适应更大的内部压力，采用新的控制设备和推进剂药柱等。芯级和助推器的连接点也比航天飞机外贮箱的连接点更低。相对于四段式助推器，其推力提高了 20%，比冲提高了 24%。

2016 年 6 月，SLS 1 型运载火箭五段式固体助推器在位于犹他州的试验场进行了第二次热点火鉴定试验(QM-2)。试验中，助推器被冷却至 4.4℃ 后点火，试验时长 126 秒，内部温度达 3300℃，助推器尾焰速度达到 $Ma = 3$ ，530 多个测量仪器提供了

82 项关键数据，其中涵盖助推器性能、声学性能、助推器振动、喷管改进、绝缘升级、助推器分离发动机结构动力响应和喷管矢量参数等，初步数据显示助推器性能良好，试验目标完成。此前，五段式固体助推器曾于 2015 年 3 月完成第一次鉴定试验(QM-1)，助推器被加热至 32℃ 后进行点火。这些数据后续将用于助推器参加实际飞行前的性能分析。

NASA 还于 2012 年启动了先进助推器工程验证和风险降低(ABEDRR)项目，旨在为 SLS 寻找更先进的助推器替代方案。先进助推器主要用于运载能力达 130 吨的 SLS2 型。先进助推器推力更大，对长期的深空探索工程而言价格更合理，同时还要与 SLS 火箭的通用芯级结构相匹配。NASA 已选定了 4 家公司的 5 个方案开展研究。后续，NASA 将对先进助推器设计、研发、试验和评估(DDT&E)进行公开竞标。

(四) 低温上面级

SLS 1 型火箭使用由“德尔它”4 火箭低温二子级改进而来的过渡型低温上面级(ICPS)，氢箱直径 5 米，氧箱直径 4 米，推进剂最大加注量为 27 吨，使用单台 RL-10B2 发动机，真空推力 110 千牛，最长工作时间为 700 秒。改进工作包括加长推进剂贮箱，增加姿控所需的肼瓶，增设电子设备等，以满足 SLS1 型火箭的载荷和工作环境要求。目前，过渡型低温上面级已完成结构试验件的制造，现已运抵试验台，准备进行结构试验。

SLS 1B 型和 SLS 2 型火箭将使用探索型上面级(EUS)，长 18.3 米，氢箱直径 8.4 米，氧箱直径 5.5 米，推进剂最大加注量为 129 吨，使用 4 台 RL-10C1 发动机，单台推力为 101 千牛，最长工作时间为 2000 秒。该上面级最早将用于 2021 年左右的 EM-2 探索任务。

(五) 肯尼迪发射场

为满足 NASA 以 EM-1、EM-2 为起点的深空探索任务，在

肯尼迪航天中心修建和改进了所需的设施和地面支持设备，改进相关的通信和控制系统，以进行 SLS 火箭和“猎户座”飞船飞行硬件的准备、组装、试验、发射和回收。目前，地面系统已完成发射平台(ML)的结构和设备改进；在垂直组装大楼开展发射平台适应性建设，为 SLS 火箭操作提供进出通道；在 39B 发射工位，建设尾焰导流槽，完成基础设施和推进剂/供气系统的改进；安装和升级软件，以支持端对端发射场指令和控制系统应用；以及移动运输车的延寿和改进。后续还将完成发射场指挥和控制系统(SCCS)的研发和验证、发射平台地面支持设备的安装和脐带安装等。

三、小结

(一) 火箭构型进行局部调整，用成熟技术加快研制进度，降低研制成本

在完成 SLS 1 型火箭 CDR 之后，NASA 对 SLS 重型火箭的构型也进行了调整，各型火箭均采用以 RS-25 主发动机为动力的公共芯级。SLS 1B 型将继续采用五段式固体助推器而不是原来的先进火箭助推器，这样有利于加快研制进度。SLS 1B 和 SLS2 型都将采用由 4 台 RL-10C 发动机组成的探索型上面级，更是利用已有的成熟上面级发动机技术，不仅可以降低研制成本，还能确保高可靠性目标。在此基础上，SLS 2 型将研制先进固体或液体助推器，以替代五段式固体助推器。

SLS 火箭是用于美国载人火星探测的专用重型火箭，不追求单发火箭的低成本和技术先进性，强调的是整个系统的高可靠性和可实现性，并对全寿命周期成本进行合理管控，符合美国国家载人航天探索目标和 NASA 总的预算要求。

(二) 重点开展大直径结构焊接、箭体结构试验和发动机试车，研保条件建设应该提前布局

NASA 在米丘德工厂安装了 6 台大型搅拌摩擦焊工装，用于 8.4 米火箭芯级主要结构件的焊接；建造了 4 个新的试验台，用于芯级贮箱、箱间段、发动机段的载荷试验；制造完成了芯级、助推器、级间段、飞船支架等结构件的样件、试验件和飞行件；开展了芯级发动机单台热点火试车(7 次)和固体助推器验证试验(3 次)与鉴定试验(2 次)。后续还将开展芯级飞行用发动机单机试验和 4 台发动机联合试验。肯尼迪航天中心的发射场适应性建设和改进已完成大部分工作，所有改进工作将于 2018 年初完成。

尽管美国在超大直径芯级制造和试验方面积累了成熟技术，仍为此安装了大型焊接工装并修建新的结构试验台；发动机试车方面，开展了多轮次热点火试车，芯级主发动机不但要进行单机试验，还要进行多机联合试验。

(三) NASA 陆续部署演进型火箭的研制，先进助推器和探索上面级是后续重点

NASA 目前将工作重点放在 SLS 1 型首飞上，但与此同时也在开展演进构型研制的相关工作。2014 年 6 月，NASA 提出研制探索型上面级替换 SLS 1 型的过渡型上面级，但 NASA 安全办公室和航天员办公室反对用新上面级执行载人任务。因此，2021 年的 EM-2 任务(SLS 1B 型首飞)将可能是一次无人试验飞行，首次载人飞行将推迟至 2023 年的 EM-3 任务。主发动机方面，现有的 16 台飞行用 RS-25 发动机仅够前 4 次飞行任务，NASA 已授出了后续任务使用的 RS-25E 发动机(一次性使用)的研制生产合同。最后，将研制全新的先进固体或液体火箭助推器，实现最终载人火星探索目标。

为进一步提高 SLS 火箭的运载能力，满足美国载人探火的最终目标，NASA 将研制重点放在探索上面级和先进助推器上，探

索上面级仍使用低温推进剂捆绑多台经过改进的“半人马座”发动机，先进助推器不排除使用“土星”5 的液氧/煤油推进剂方案。

(四) 美国私营公司也在发展重型火箭，将对未来市场产生深刻影响

SpaceX 公司已经成功进行了 20 余次“猎鹰”9 火箭的发射，仅有 1 次失败，还成功进行了一子级火箭的陆上和海上垂直着陆回收，目前正在研制运载能力达到 54 t 的“猎鹰重型”(Falcon H)火箭，它以现有“猎鹰”9 火箭一子级为公共芯级和助推器，上面级采用改进型的“隼”1D 发动机，该火箭未来将执行大型有效载荷的发射任务和火星探测任务。“猎鹰重型”火箭也将考虑回收一子级和助推器。

“猎鹰重型”火箭充分利用已有的“猎鹰”9 火箭成熟技术，通过批量生产和一子级回收降低发射成本。该火箭将瞄准大载荷、多任务飞行，竞争美国政府和商业载荷的发射任务，对未来市场态势的影响不可低估。

(北京航天长征科技信息研究所)